

Dreidimensionale Rekonstruktion von Oberflächenprofilen

Die Erfindung betrifft Verfahren zur Erfassung und Rekonstruktion von Strukturen auf Oberflächen, wie z.B. Erhebungen, Grate oder Senken.

5

Es sind verschiedene Verfahren bekannt, mit denen Profile von Oberflächen erfasst werden können. Zwei verschiedene Prinzipien können dabei unterschieden werden: Zum einen Verfahren, bei denen die zu charakterisierende Oberfläche direkt, z.B. mechanisch, abgetastet wird, zum anderen berührungslose Techniken.

Mechanische Abtastinstrumente, sogenannte „Profilometer“, führen eine Abtastnadel rasterförmig über die Oberfläche der Probe und detektieren dabei die sich durch das Oberflächenprofil vertikal ändernde Position der Nadelspitze. Sie werden häufig dort eingesetzt, wo die zu untersuchenden Objekte und der darauf zu erfassende Oberflächenbereich nicht sehr groß sind, da einerseits eine exakte Positionierung des Probestücks unter dem Abtaster erforderlich ist, zum anderen die zeilenweise Abtastung größerer Felder mit einem entsprechenden zeitlichen Aufwand verbunden ist.

Berührungslose Abtastverfahren nutzen beispielsweise die Reflexion von Ultraschall (Prinzip des Echolots) oder basieren auf optischen (z.B. Laser-Scan) bzw. radartechnischen Verfahren. Je nach Einsatzgebiet ist dabei das eine oder andere Verfahren vorteilhafter. Ultraschallverfahren sind nicht in

Fig. 5 Zusätzliche Hervorhebung des Verlaufs von Graten und Umrisslinien um Flanken der Erhebungen

5 Fig. 6 Profil-Rekonstruktion der untersuchten Region

Fig. 7 Aufnahmen eines ca. 0,5 cm hohen Grates auf einer Metallfläche; Lichteinfall von links und rechts

10 Fig. 8 Errechnetes Höhenprofil des Grates aus Fig. 7

Fig. 9 Perspektivische Darstellung des rekonstruierten Grates

15 Fig.10 Aufnahmen einer Werkstückoberfläche mit kleinem Defekt; Lichteinfall von links und rechts

Fig.11 Errechnetes Höhenprofil der Strukturen auf der Werkstückoberfläche der Figur 10

20

Fig.12 Bildüberlagerung farbselektiver Aufnahmen einer Oberflächenstruktur

Fig.13 Prägung auf einem Metallwerkstück; Aufnahmen bei unterschiedlichem Lichteinfall

25

Fig.14 Ausschnitt aus Fig. 13 mit Lichteinfallrichtungen (Pfeile) und rekonstruierten Aufnahmen

30 Fig.15 Rekonstruktion der Prägung nach dem erfindungsgemäßen Verfahren mit integriertem Shape from Shading

Das erfindungsgemäße Verfahren wertet verschiedene Bilder desselben Bereichs der zu untersuchenden Oberfläche aus, wo-

bilder" mit Pixelwerten I_1/I_2 bzw. I_2/I_1 . Durch die Quotientenbildung werden Bereiche mit geringer Albedo (auf ansonsten glatten Bereichen der Oberfläche), die bei Betrachtung nur eines Ausgangsbildes wegen des Helligkeitsunterschieds irrtümlich als Schatten gewertet werden könnten, annulliert, da beide Ausgangsbilder (gleicher Einstrahlwinkel der Lichtquelle vorausgesetzt) für diese Bereiche die gleichen Helligkeitswerte aufweisen, was sich damit bei Quotientenbildung aufhebt. Die Quotientenbilder enthalten dann - stark kontrastiert - die Schlagschattenbereiche separiert nach Lichteinfall, d.h. jedes Quotientenbild I_1/I_2 bzw. I_2/I_1 liefert die Areale der Schlagschatten, die jeweils bei Beleuchtung nur von einer Seite auftreten.

Im nächsten Schritt werden die Konturen der Schlagschatten-Areale extrahiert. Dies erfolgt beispielsweise durch eine „binary connected component“ (BCC)-Analyse der Quotientenbilder (vergl. E. Mandler, M. Oberländer: One Pass Encoding of Connected Components in Multi-Valued Images, *IEEE Int. Conf. On Pattern Recognition*, pp64-69, Atlantic City, 1990). Die so erhaltenen Konturen können noch durch Glättungsverfahren, z.B. B-Spline-Interpolation (vergl. D.F. Rogers: An Introduction to NURBS - With Historical Perspective, Academic Press, San Diego, 2001) verfeinert werden, um die Genauigkeit der Profil-Rekonstruktion über die reine Auflösung der Bilder (Bildpunkt-Raster) hinaus weiter zu erhöhen. Alternativ können die beispielsweise mit dem BCC-Algorithmus ermittelten Konturen als Initialisierung für eine Segmentierung der Schattenumrisse auf den Ausgangsbildern mit Active-Contours verwendet werden (vergl. D.J. Williams, M. Shah: A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation, *Computer Vision, Graphics Image Processing*, 55, pp. 14-26, 1992).

Schwellwert θ_1 bzw. θ_2 ist. Zusätzlich wird berücksichtigt, welche der so selektierten Bereiche jeweils nur in einem der beiden Ausgangsbilder beleuchtet sind und im anderen nicht, d.h. für die in den jeweiligen Quotientenbildern gilt

- 5 $I_1/I_2 > \theta_0$ (bzw. $I_2/I_1 > \theta_0$), wobei θ_0 ein vorgegebener Schwellwert für die Quotientenbilder ist. Die auf diese Weise als Neigungsflächen identifizierten Bereiche können wieder mittels BCC-Algorithmus und/oder Active-Contour Verfahren als Konturverläufe extrahiert werden. In Verbindung mit dem er-
- 10 mittelten Höhenverlauf (Grat) lässt sich der Neigungswinkel abschätzen (z.B. einer Gratflanke) und damit letztlich das Profil der Erhebung rekonstruieren.

- Der Verlauf von Flanken ist hierbei nur relativ grob angenähert bestimmbar (lineare Steigung). Veränderungen des Nei-
- 15 gungsverlaufs oder auch flache Strukturen (niedrige Senken, leichte Anhebungen mit geringer Neigung) lassen sich jedoch durch Shape-from-Shading Methoden bestimmen (vergl. X. Jiang, H. Bunke, Dreidimensionales Computersehen, Springer Verlag,
- 20 Berlin 1997). Dabei werden leichte Veränderungen der reflektierten Lichtintensität ausgewertet, um bei bekannter geometrischer Anordnung zwischen Kamera, Objekt und Lichtquelle auf die jeweilige Neigung der reflektierenden Bereiche zu schließen. Kombiniert man das erfindungsgemäße Verfahren mit der
- 25 Shape-from-Shading Methode, so sind Oberflächenprofile mit hoher Qualität rekonstruierbar. Ein Beispiel hierfür ist in Fig. 13 - 15 wiedergegeben (Erläuterung unter Anwendungsbeispiel 3).

- In besonders vorteilhafter Weise wird zunächst das Oberflächenprofil der zu rekonstruierenden Fläche bei geeigneter I-
- 30 nitialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ermittelt. Anschließend wird dann in besonders gewinnbringender Weise der Winkel zwischen jedem Flächenelement und der für das Schattenbild gültigen Lichteinfallsrichtung mit einem

nach rechts) in beiden Aufnahmen praktisch identische Abbildungen liefern. Diese Strukturen lassen sich jedoch einfach durch Wiederholung des Verfahrens bei Beleuchtung von anderen Seiten (hier z.B.: Oben/Unten-Beleuchtung) in entsprechender
5 Weise identifizieren, so dass letztlich alle Profilanteile durch wiederholte Anwendung des Verfahrens bei unterschiedliche Einstrahlrichtung rekonstruiert werden können.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich durch einen sehr
10 breiten Anwendungsbereich aus. Sowohl Oberflächen astronomischer Objekte in großer Entfernung können untersucht werden, als auch übliche Produkte in der industriellen Fertigung, bis hin zu kleinen Strukturen unter dem Mikroskop. Drei Anwendungsbeispiele zur Oberflächenprofilierung und Rekonstruktion
15 sollen dies verdeutlichen:

Anwendungsbeispiel 1

Rekonstruktion von Strukturen auf der Mondoberfläche

20

In Figur 1 ist ein Teil der Mondoberfläche wiedergegeben, wie er mit einem üblichen Teleskop aufgenommen werden kann (hier: 125mm Spiegelteleskop, 2600mm Brennweite, CCD-Kamera). In der dargestellten Region sind die Formationen „Hesiodus und
25 „Wolf“ erkennbar (mit *H* bzw. *W* gekennzeichnet). Ein Detailausschnitt etwa zwischen diesen Formationen ist hervorgehoben und vergrößert in Figur 2.1 und 2.2 wiedergegeben. Dabei zeigt Teilbild 2.1 diesen Bereich bei Lichteinfall von links und Teilbild 2.2 den Bereich bei Lichteinfall von rechts, wo-
30 bei die Sonneneinstrahlung jeweils unter einem flachen Winkel von ca. 4° zur Mondoberfläche einfällt. Deutlich sind die seitlichen Schattenfelder der Erhebungen zu erkennen. Figur 3 zeigt die kontrastverstärkte Extraktion der Schattenfelder durch rechnerische Bildung des Quotienten I_1/I_2 (bzw. I_2/I_1)

flachem Winkel zur Oberfläche einfällt. Figur 8 zeigt das aus diesen Aufnahmen mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bestimmte Höhenprofil des Grates, der eine Höhe von bis zu etwa 5 mm aufweist. Zwei perspektivische Ansichten des rekonstruierten
5 Grates sind in Figur 9 wiedergegeben.

Auch deutlich kleinere Strukturen lassen sich so bestimmen: Figur 10 zeigt in zwei Teilbildern (streifende Beleuchtung von verschiedenen Seiten) den Oberflächenausschnitt eines
10 weiteren untersuchten Werkstücks (Metallplatte) mit relativ kleinen Defekten (zwei parallel verlaufende Grate). Die Grate selbst sind bei senkrechter Kameraposition fast nicht erkennbar, deutlich sind aber die durch seitliche Beleuchtung erzeugten Schatten der Grate (punktierte Linien). Nach Auswertung dieser Bilder mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lässt
15 sich das Profil der Grate wie in Figur 11 dargestellt rekonstruieren. Die Höhe der Grate beträgt in diesem Beispiel etwa 1,5 bzw. 0,6 mm).

20 Anwendungsbeispiel 3 :

Rekonstruktion einer Prägung mit integriertem „Shape-from-Shading“

25 Figur 13 zeigt ein Werkstück aus Metall mit einer Prägung (Ausschnitte) bei Beleuchtung von unterschiedlichen Seiten. In Figur 14 sind die Ausschnitte wiedergegeben, die Pfeile geben die Einstrahlrichtung an, die rechten Teilbilder sind die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erhaltenen Rekonstruktionen. Figur 15 ist die perspektivische Darstellung des
30 Ergebnisses mit integriertem Shape-from-Shading, so dass die rekonstruierten Verläufe von Flanken und Mulden gut mit dem Original übereinstimmen. Die Prägungstiefe beträgt in diesem Beispiel etwa 0,4 mm.

Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Erfassung und Rekonstruktion von
5 Oberflächenprofilen,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die zu untersuchende Oberfläche aus verschiedenen
Richtungen unter flachem Einstrahlwinkel beleuchtet wird
und dabei Aufnahmen der Oberfläche aus einer Kameraposi-
10 tion mit steilem Winkel zu Oberfläche angefertigt werden
und durch Extraktion der Konturen von Schlagschatten auf
den Aufnahmen aus Lichteinfallwinkel und Kameraposition
Höhenprofile von Strukturen ermittelt werden.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Kamera nahezu lotrecht zur Oberfläche angeordnet
wird.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass der Lichteinfallwinkel kleiner 10° zur Oberfläche
beträgt.
- 25 4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Schlagschatten auf den Aufnahmen durch Bildung
der Quotienten aus Helligkeitswerten korrespondierender

richtung mit einem konstanten Faktor so multipliziert wird, dass der mittlere Höhenunterschied auf dem rekonstruierten Profil dem zuvor gemäß der oben erläuterten Schattenanalyse ermittelten mittleren Höhenunterschied entspricht,

dass im nächsten Schritt als Initialisierung mittels der Shape-from-Shading Methode ein neues Oberflächenprofil berechnet wird,

und dass dieser Vorgang iterativ solange wiederholt wird, bis die mittlere Veränderung des Höhenprofils zwischen zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten kleiner als ein vorgegebener Schwellwert ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

dass bei einer iterativen Minimierung im Rahmen der Shape-from-Shading Methode diese dahingehend verbessert wird,

dass bei der zu optimierenden Fehlerfunktion ein zusätzlicher Fehlerterm addiert wird, wobei dieser additive Term die Abweichung des aus dem im vorigen Iterationsschritt rekonstruierten Höhenprofil ermittelten Höhenunterschiedes in Lichteinfallrichtung von dem mittels der Schattenanalyse bestimmten entsprechenden Höhenunterschied beschreibt.

11. Verfahren nach Anspruch 10,

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,

dass zur Initialisierung der iterativen Minimierung das Ergebnis des Verfahrens nach Anspruch 9 verwendet wird.

12. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11, zur Rekonstruktion von planetaren Oberflächen.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/010729

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	<p>GB 2 297 616 A (NIRECO CORP) 7 August 1996 (1996-08-07) page 3, paragraph 3 - page 4, paragraph 2 page 8, paragraph 2 - page 11, paragraph 2; figures 1-4</p> <p>-----</p>	1,2,7,13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/010729

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5064291	A	12-11-1991	JP 2062048 C	10-06-1996
			JP 4364443 A	16-12-1992
			JP 7097084 B	18-10-1995
			KR 9509067 B1	14-08-1995
US 2002118359	A1	29-08-2002	US 6288780 B1	11-09-2001
			US 5822055 A	13-10-1998
			US 2004252297 A1	16-12-2004
			US 2002054291 A1	09-05-2002
			US 6078386 A	20-06-2000
			US 2003063274 A1	03-04-2003
			US 2004017562 A1	29-01-2004
			US 2004223146 A1	11-11-2004
EP 0848244	A	17-06-1998	WO 9639619 A1	12-12-1996
			DE 19652124 A1	25-06-1998
			EP 0848244 A2	17-06-1998
			JP 10275885 A	13-10-1998
GB 2297616	A	07-08-1996	US 5940681 A	17-08-1999
			JP 3041826 B2	15-05-2000
			JP 7333154 A	22-12-1995
			JP 7333156 A	22-12-1995
			DE 19520190 A1	15-02-1996
			DE 19549545 C2	08-08-2002
			GB 2289941 A , B	06-12-1995

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2004/010729

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES IPK 7 G01N21/84 G01N21/88 G01N21/956		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) IPK 7 G01N		
Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data, PAJ		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 5 064 291 A (REISER KURT) 12. November 1991 (1991-11-12) Spalte 2, Zeile 41 - Zeile 60 Spalte 8, Zeile 30 - Spalte 9, Zeile 24; Abbildung 7	1 2,3,13
A	----- US 2002/118359 A1 (FAIRLEY CHRISTOPHER R ET AL) 29. August 2002 (2002-08-29) Absatz '0072! - Absatz '0078!; Abbildungen 3-7	1-3,13
A	----- EP 0 848 244 A (MICRONAS INTERMETALL GMBH) 17. Juni 1998 (1998-06-17) Spalte 8, Zeile 2 - Zeile 55; Abbildung 4 ----- -/--	1-3,13
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen </div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie </div> </div>		
<div style="display: flex;"> <div style="flex: 1;"> <p>* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :</p> <p>*A* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist</p> <p>*E* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist</p> <p>*L* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)</p> <p>*O* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht</p> <p>*P* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist</p> </div> <div style="flex: 1;"> <p>*T* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist</p> <p>*X* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden</p> <p>*Y* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist</p> <p>*Z* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist</p> </div> </div>		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts	
4. Januar 2005	18/01/2005	
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter Stuebner, B	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören:

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2004/010729

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 5064291	A	12-11-1991	JP 2062048 C	10-06-1996
			JP 4364443 A	16-12-1992
			JP 7097084 B	18-10-1995
			KR 9509067 B1	14-08-1995
US 2002118359	A1	29-08-2002	US 6288780 B1	11-09-2001
			US 5822055 A	13-10-1998
			US 2004252297 A1	16-12-2004
			US 2002054291 A1	09-05-2002
			US 6078386 A	20-06-2000
			US 2003063274 A1	03-04-2003
			US 2004017562 A1	29-01-2004
			US 2004223146 A1	11-11-2004
			WO 9639619 A1	12-12-1996
EP 0848244	A	17-06-1998	DE 19652124 A1	25-06-1998
			EP 0848244 A2	17-06-1998
			JP 10275885 A	13-10-1998
			US 5940681 A	17-08-1999
GB 2297616	A	07-08-1996	JP 3041826 B2	15-05-2000
			JP 7333154 A	22-12-1995
			JP 7333156 A	22-12-1995
			DE 19520190 A1	15-02-1996
			DE 19549545 C2	08-08-2002
			GB 2289941 A , B	06-12-1995

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.